2002 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

DeCART 코드에 의한 SMART 노심 2차원 계산

Two-Dimensional SMART Core Calculation by the DeCART Code

조진영, 김강석, 주한규, 지성균, 장문희

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요약

전노심 수송해석코드인 DeCART에 핵단면적 Library를 직접 읽고 처리할 수 있는 모듈을 장착하여, 사전의 소수군 군정수 생산없이 직접 다군 전노심 해석을 수행할 수 있는 기능을 구현하였다. 이 기능의 검증의 일환으로 SMART 노심에 대한 DeCART 2차원 노심계산을 수행하고 SMART 노심설계에 사용된 CASMO/MASTER 계산결과와 비교/검증하였다. 이를 위해 먼저 SMART 노심에 사용된 각 핵연료집합체 종류별 DeCART 집합체 계산을 수행하고 그 결과를 노심계산 코드용 군정수 생산에 사용되는 HELIOS 및 CASMO 코드와 비교하였다. DeCART 코드는 HELIOS 코드와 비교하여 집합체내 봉출력에서는 최대 1~2% 정도의 차이를, 무한증배계수에서는 최대 200~300 pcm 정도의 차이를 보였다. 다음으로 SMART 2차원 노심에 대한 35군 전노심 계산을 수행하여, DeCART 코드가 1시간 정도의 계산 시간에 결과를 출력하는 신속성과 정확성을 확인하였다. 이 결과는 CASMO/MASTER 체계와 비교하여 노심 반응도에서는 약 200pcm 내에서, 집합체 출력분포에서는 약 5% 정도에서 차이를 보였다.

Abstract

A new module to treat the HELIOS library is implemented to DeCART code and verified by solving assembly level and two-dimensional SMART core problems. In assembly level problems, DeCART code shows maximum of 1~2 % differences in the pin power and 200~300 pcm in the infinite multiplication factors from HELIOS code. In the two-dimensional core problem, DeCART code shows a good calculation speed by obtaining the results within an hour and hgh accuracy of about maximum 200 pcm difference in eigenvalue and 5% in assembly power from CASMO/MASTER code that is used as a design code system of SMART core.

1. 서 론

DeCART 코드[1,2]는 전노심 중성자 수송계산을 목적으로 개발중인 코드이다. 규격셀에 대한 중성자 추적방법에 기초한 이 코드는 가속방법으로 노달 노심계산코드에 널리 사용되고 있는 비선형 유한차분법을 도입하고 있다. 그간 이 코드는 횡방향 중성자 누설 연계 방법을 통한

반경방향 MOC, 축방향 NEM 방법을 도입하여 3차원 노심계산 성능[3]을 갖추게 되었다. 그리고 그 성능의 평가 및 검증은 다군 중성자 핵단면적이 주어진 벤치마크 문제에 대해 다른 코드의 결과와 비교함으로서 수행되어 왔다.

최근, DeCART 코드에는 HELIOS Library와 같은 다수군 핵반응 단면적을 직접 읽고 처리할 수 있는 모듈이 장착하였다. Library 처리모듈은 그 성능이 검증된 DENT-2D[4] 모듈과 동일한 것으로, 공명 처리에 필요한 등가 핵단면적을 전 노심 계산을 통해 생산한다. 이러한 등가핵단면적 계산방법은 각 셀별 또는 집합체별로 이상경계조건을 사용한 기존의 방법론의 한계를 극복한 것으로 판단된다.

이 논문에서는 DeCART 코드의 성능평가의 일환으로, 실제 노심인 SMART 노심에 DeCART 코드를 적용하기로 한다. 이를 위해 먼저 SMART 노심에 장착된 핵연료집합체를 대상으로 하여 노심계산 코드용 군정수 생산에 사용되는 CASMO[5], HELIOS[6] 등과 그 결과를 비교함으로써 노심구성 물질들의 입력조건을 검토한다. 이를 바탕으로 실제 2차원 노심계산을 수행하고 그 결과를 SMART 노심설계에 사용된 CASMO/MASTER[7] 코드체계와 비교함으로써 DeCART 코드의 전노심 계산능을 평가한다.

이 논문의 제 2절에서는 핵연료집합체 계산시와는 달리 전노심 계산시 나타나는 핵단면적 처리에서의 문제점과 DeCART 코드에서의 이에 대한 해결방안, 그리고 핵단면적 처리모듈의 특징을 간략히 소개한다. 제 3절에서는 규격셀이 아닌 핵연료집합체 사이의 간극에 대한 DeCART 코드의 처리방법을 소개하고 이러한 방법을 사용한 SMART 핵연료집합체 계산 결과를 CASMO, HELIOS 등과 비교/평가한다. 그리고 제 4절에서는 실제 2차원 노심 계산을 수행하며 이를 CASMO/MASTER 코드체계 결과와 비교/평가한다.

2. 핵단면적 처리 모듈

전노심 중성자 수송계산을 목표로 하는 DeCART 코드는 일반적인 군정수 생산코드들에 비해 매우 많은 계산 영역을 갖게 되며 이들 모든 영역에 대한 핵단면적 자료는 그 자체로서 매우 방대한 양이 된다. 따라서 이를 적절히 처리하지 않으면 실제 노심계산시 컴퓨터의 기억용량 부족을 초래하여 전노심 계산의 실질적인 구현을 불가능하게 한다. DeCART 코드는 전노심 중성자 수송계산시 발생하는 이러한 문제를 해결하기 위해 핵단면적 균일 영역 개념과 필요한 핵단면적을 수시로 Library로부터 직접 계산하는 체제를 도입하였다. 이 장에서는 이러한 DeCART 코드의 핵단면적 처리 방법의 특징적인 몇가지 부분을 소개하기로 한다.

2.1 핵단면적 균일 영역

핵단면적 균일 영역은 각 영역에서 핵단면적을 계산하기 위한 조건, 즉 핵종별 수밀도, 영역의 온도, 기저 핵단면적(background cross section) 등이 비슷하여, 계산되어 나오는 거시핵단면적도 거의 같은 영역을 의미하며, DeCART 코드는 각 셀에 대해 셀 내의 몇 개의 영역을 통합하여 이를 정의한다. 핵연료셀을 예로 들면, 핵단면적을 계산하기 위한 조건은 셀 중심으로부터의 거리에 대해서는 매우 민감하나 같은 거리에서의 방향각에 따라서는 거의 차이가 없다. 따라서 DeCART 코드는 핵연료집합체에 들어가는 모든 셀에 대해서는 핵단면적 균일 영역을 셀 중심으로부터 고리 모양으로 나눈다. 그림 1은 일반적인 핵연료셀에 대해 DeCART 코드가 어떻게 핵단면적 균일 영역을 나누는지를 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 중성자원 균일 영역의 수는 56개이나 핵단면적 균일 영역은 단지 7개이다. 이러한 방법의 도입은 계산 결과에는 거의 영향을 주지 않으면서 핵단면적 계산 시간 및 저장 용량은 상당히 줄여주는 효과가 있다.

2.2 등가 핵단면적 생산

등가 핵단면적은 Subgroup 방법을 통한 공명영역 군정수 처리에 필요한 인자로서, 비균질 영역의 기하학적 구조와 조성물질의 특성을 대표한다. 이러한 등가 핵단면적은 공명에너지 영역에 대한 고정선원 수송계산을 통해 구해진다. 따라서 핵단면적을 필요한 경우마다 수시로 계산하는 DeCART 코드는 이러한 등가 핵단면적을 우선 계산하여 저장해 두어야 한다. 이러한 등가 핵단면적은 실제 계산에 사용되는 것과 동일한 MOC 모듈을 사하여한 전 노심 수송계산을 통해 구하며, 핵단면적 균일 영역별, 공명 에너지군 별로 대표물질의 핵단면적 함수로 저장된다.

2.3 핵단면적 계산체계

DeCART 코드는 핵단면적 자료 저장에 따른 기억용량 문제를 해결하기 위해 전노심 수송계산시 주어진 평면과 에너지군에 대한 수송핵단면적 외에는 핵단면적 자료를 저장하지 않는 방법을 도입하였다. 즉, 수송계산시 필요한 중성자원은 매번 반복 계산때마다 핵단면적 균일 영역에 대한 핵단면적 자료를 생산하여 사용하며, 거시격자 유한차분법 계산을 위한 셀 균질화시에도 필요한 핵단면적을 매번 계산하여 사용한다.

그림 2는 DeCART 코드내에서의 핵단면적 계산체계를 요약하여 보여준다. DeCART 코드는 먼저 핵단면적 Library 및 입력파일을 읽고, 전노심 수송계산 및 거시격자 유한차분법 계산을 위해 요구되는 기하학적 구조 해석을 선행한다. 등가 핵단면적 생산은 이들 기하구조 자료와 핵단면적 Library를 이용하여 실제 전노심계산 전에 수행되며 각 영역별로 대표물질 핵단면적 함수로 저장된다. 핵단면적 공명처리 및 각 핵단면적 균일 영역에 대한 핵단면적 생산은 그림에 보이는 바와 같이 크게 3개의 모듈, 즉 셀 균질화 모듈, MOC 계산모듈 및 결과 출력모듈에서 수행된다. 그리고 이러한 핵단면적 생산은 DeCART 코드가 수렴된 결과를 얻을때까지 필요시마다 계속 수행된다.

3. 핵연료 집합체 계산

SMART 노심은 4.95% 농축 우라늄 핵연료를 사용하며, 가연성 독물질로는 가돌리니아 독봉 외에 보론의 양을 달리한 세 종류의 Al_2O_3-B_4C 독봉 등, 총 4 종류의 독봉이 사용된다. 따라서 SMART 노심에 장전되는 핵연료 집합체는 이들 독봉의 장전 방법에 따라 구분되며, 세 종류의 핵연료 집합체, A, B, C 가 노심에 장전된다.

한편, DeCART 코드는 규격셀(Modular Cell)을 기본으로 하여 방향각 및 중성자 추적선 등을 결정한다. 그러나 실제 핵연료집합체에는 이러한 규격셀 외에 핵연료집합체와 집합체 사이에 간극이 존재하게 된다. 따라서 DeCART 코드를 사용하여 핵연료 집합체 계산을 수행하기 위해서는 이들 집합체간의 간극을 DeCART 계산시 고려해주어야 한다. DeCART 코드는 집합체간 간극을 고려하기 위해 집합체 외각 셀에 대해 간극의 영향을 근사적으로 포함시키는 방법을 사용한다. 그림 3은 DeCART 코드가 이러한 집합체간 간극의 영향을 어떻게 포함시키는지를 보여주고 있다. DeCART 코드는 집합체 외각 셀에 대해 간극을 포함하는 냉각재의 총 질량을 보존하도록 냉각재 밀도를 보정하는 방법을 사용한다. 따라서 실제 무독봉 핵연료집합체에는 한 종류의 핵연료셀이 사용되더라도 DeCART 코드는 집합체간 간극을 고려하기 위해 주어진 기본셀 외에 냉각재 밀도를 달리한 2 종류의 셀이 더 사용된다.

표 1 및 그림 4는 집합체간 간극이 핵연료집합체의 무한증배계수 및 출력분포에 어느 정도의

영향을 미치는 지와 DeCART 코드에서 사용하는 이러한 근사적 간극처리방법이 타당한지를 보여준다. 또한 표 1은 DeCART 코드의 집합체 계산 성능 평가도 함께 보여준다. 이들 평가에는 HELIOS 및 CASMO 코드가 사용되었다. HELIOS 계산에는 45 에너지군 Library를 사용하였으며, 경계면에서의 각분할법 옵션으로 -4, 공명처리 방법 옵션으로는 1을 사용하였다. 그리고 DeCART 코드 계산에는 35 에너지군 Library를 사용하였으며, 계산능 평가에는 MOC 계산에 따른 오차의 영향을 최소화하기 위한 입력치인 0.02/16/4(추적선 간격, cm/180°에 대한 방향각 수/90°에 대한 방위각 수) 및 어느 정도의 정확도가 있다고 판단되는 0.05/8/2 를 사용하였다. 표와 그림에서 알 수 있듯이 DeCART 코드에서는 근사적인 집합체간 간극 영향 고려 방법이 매우 잘 적용되어, 다른 코드들과 같이 집합체간 간극 영향을 잘 묘사함 알 수 있다. DeCART 코드의 집합체내 봉출력분포는 두가지 입력치에 대해 거의 같게 나타났으며 HELIOS 결과와 비교해 최대 약 1~2% 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 무한증배계수에서는 입력치 0.05/8/2의 결과가 0.02/16/4의 결과에 비해 대체로 HELIOS 결과와 더 유사하게 나타났다. 그러나 DeCART 코드의 최종 결과치는 0.02/16/4의 결과와 거의 같음을 고려할 때, DeCART 코드는 집합체내 무한증배계수에서 HELIOS 코드에 비해 약 200~300 pcm 높게 예측함을 알 수 있다.

4. 2차원 SMART 노심 계산

이 절에서는 DeCART 코드에 의해 2차원 SMART 노심계산을 수행하며, SMART 노심설계에 사용된 CASMO/MASTER 체계의 결과와 비교 분석한다. 이를 위해 축방향으로 존재하는 Spacer Grid 는 타 코드에서의 처리하는 방법과 같은 냉각재로의 균일 분산 처리방법을 사용하였으며, 이를 제외하면 실제 노심내 기하구조를 충실히 반영하였다. 중성자 추적선에 대한 DeCART 입력치로는 0.05/8/2를 사용하였으며, 노심은 90° 대칭조건, 반사체로는 핵연료집합체 크기의 반사체가 노심 외각에 붙어있는 것으로 처리하였다. 그리고 반사체 바깥부분은 진공경계조건을 사용하였다.

그림 5는 SMART 노심의 반경방향 핵연료집합체 장전 및 반사체 모형을 보여준다. 또한 이 그림은 노심과 접한 반사체 부근에 대한 DeCART 코드의 균일 중성자원 영역 분할 방법을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이 노심과 Barrel 사이에는 핵연료 집합체 사이의 간극과는 다른 0.1 cm의 간극이 있으며, 2 cm 두께의 Barrel 바깥에는 SA240과 물이 부피비 10:1로 섞여 존재한다.

표 2 및 그림 6은 2차원 SMART 노심에 대한 DeCART 코드의 결과를 CASMO/MASTER 결과와 비교한 것이다. DeCART 코드는 표에서 알 수 있듯이 1GHz PENTIUM III PC에서 2차원 SMART 노심계산에 약 1시간 정도 소요되어 매우 신속함을 알 수 있다. 또한 CASMO/MASTER 코드체계는 DeCART 코드와 비교해 노심 반응도에서는 HZP 상태에서는 약 60 pcm 이내에서, CZP 상태에서는 약 250 pcm 이내에서 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 집합체 출력분포 측면에서는 HZP 상태에서는 최대 1.2% 내에서, CZP 상태에서는 약 5% 범위 내에서 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과들은 DeCART 코드가 전노심 계산을 통해 기존의 집합체 균질화, 반사체 군정수 생산, 노심계산 등과 같은 일련의 절차를 거치는 노심계산체계의 검증/평가 계산에 훌륭하게 사용될 수 있음을 의미한다.

5. 결론

이 연구에서는 다군 핵단면적 Library를 읽고 처리하는 모듈을 DeCART 코드에 장착하였으며 SMART 2차원 전노심 계산을 통해 그 성능을 평가하였다. 계산 결과, DeCART 코드는 단위 집합

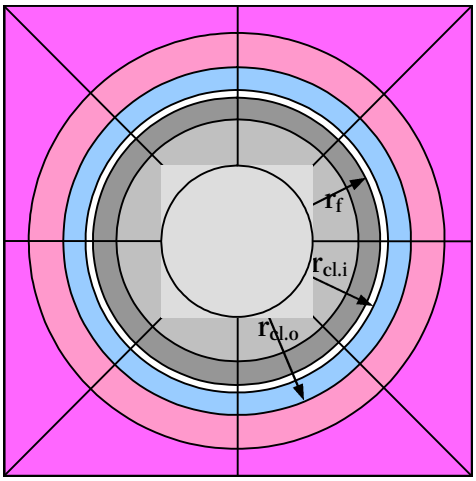
체 계산뿐만 아니라, SMART 2차원 전노심 계산에서도 신속하고 정확한 결과를 도출하여, 기존의 집합체 균질화, 반사체 군정수 생산, 노심계산 등과 같은 일련의 절차를 거치는 노심계산체계의 검증/평가 계산에도 훌륭하게 사용될 수 있음을 보였다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부가 수행하고 있는 원자력 선진기술획득사업 과제의 일환으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. J. Y. Cho et al., "Cell Based CMFD Formulation for Acceleration of Whole-core Method of Characteristics Calculation," Journal of the Korean Nuclear Society., Vol. 34. No. 3, 2002.
2. H.G.Joo et al., "Dynamic Implementation of the Equivalence Theory in the Heterogeneous Whole Core Transport Calculation," PHYSOR 2002, Seoul, Korea, Oct. 7-10, 2002.
3. J. Y. Cho et al., "Three-Dimensional Heterogeneous Whole Core Transport Calculation Employing Planar MOC Solutions," Transaction Am. Nucl. Soc., Nov. 17-21, 2002.(to be published).
4. K. S. Kim et al., "Development of DENT-2D Code Based on the Characteristics Method," Transaction Am. Nucl. Soc., June, 2002.
5. E. Edenius et al., "CASMO-3, A Fuel Assembly Burnup Program Methodology Version 4.4," STUDSVIK/NFA-89/2 (1989).
6. R. J. Stamml'er et al., "HELIOS Methods," Studsvik Scanpower(1998).
7. B.O.Cho, et al., "MASTER-2.0: Multi-Purpose Analyzer for Static and Transient Effects of Reactors," KAERI/TR-1211/99 (1999).



색: 핵단면적 균일 영역

그림 1. 핵연료봉셀내부의 핵단면적 균일 영역

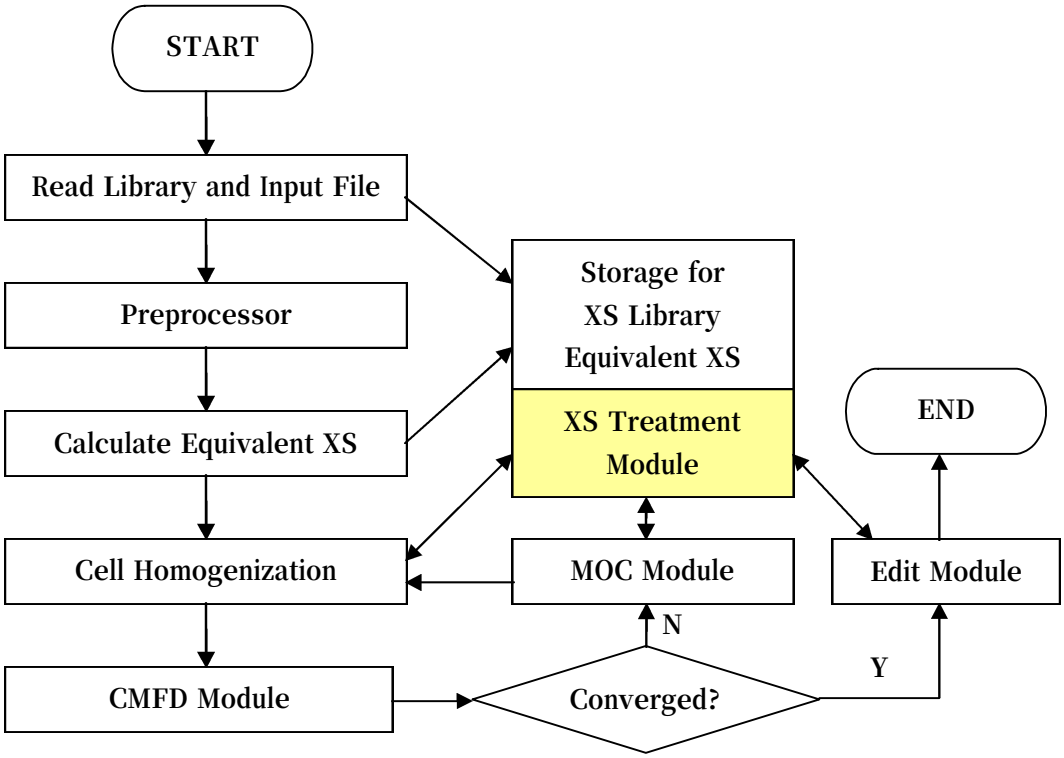


그림 2. 핵단면적 처리 모듈

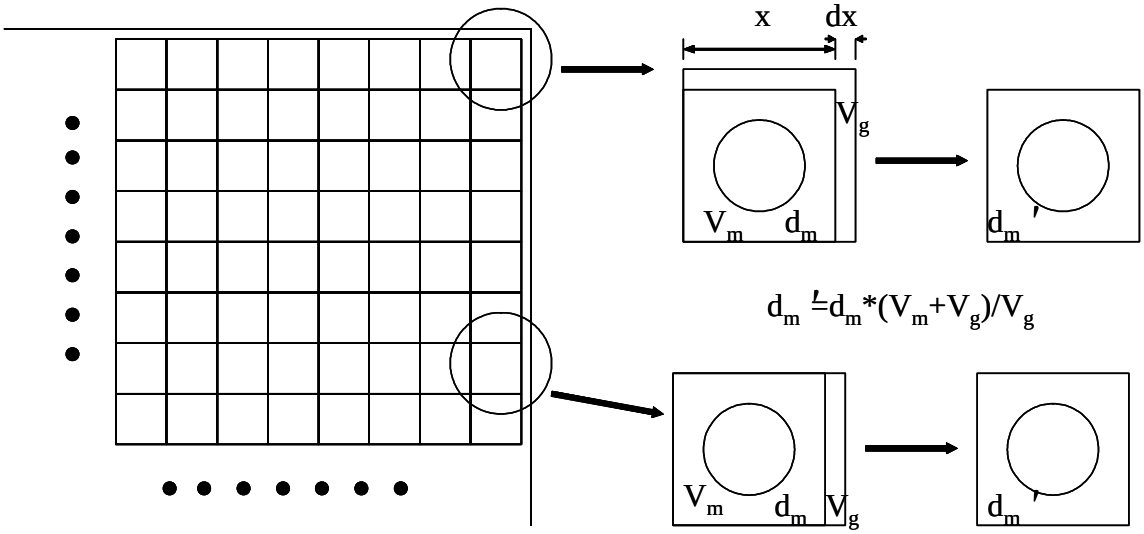


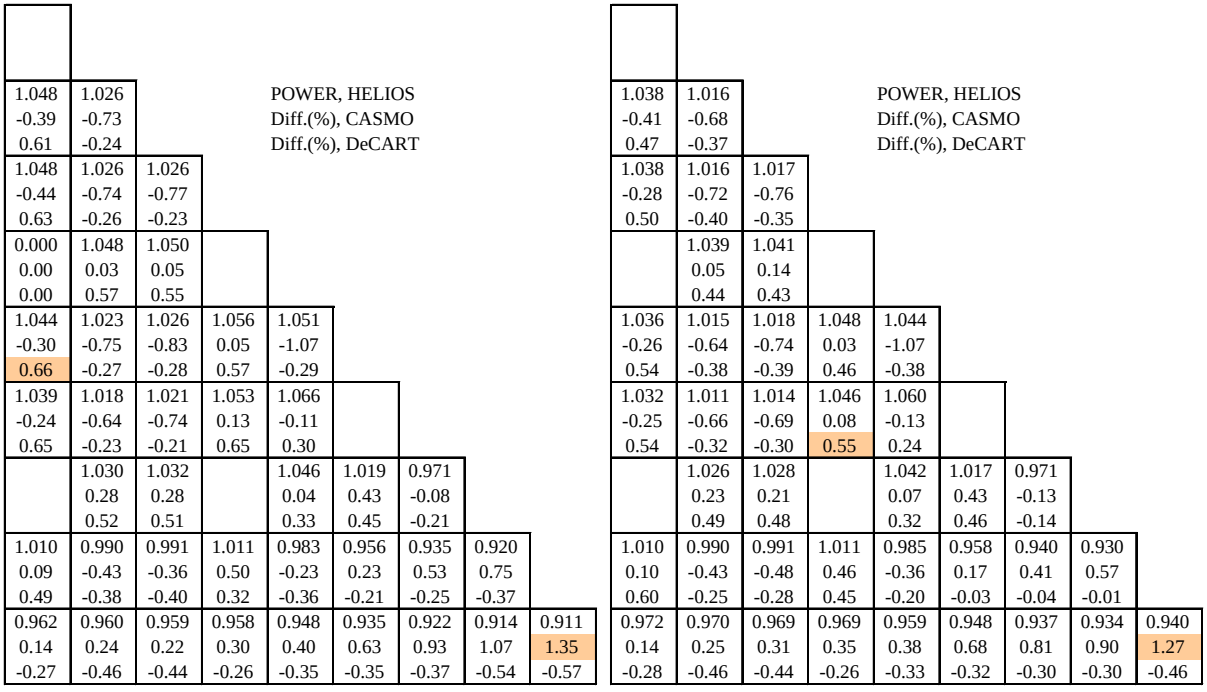
그림 3. 핵연료집합체간 간극 처리

표 1. 핵연료 집합체 계산 결과

Type	Temp.(K)	Gap	Kinf	Diff(pcm)			Max. Power Diff.(%)	
			HELIOS	CASMO	DeCART		CASMO	DeCART
					*0.02/16/4	0.05/8/2		
NoBP	600	X	1.43345	-180.7	224.5	91.2	1.35	0.66
		O	1.43536	-192.3	240.6	109.8	1.27	0.55
	300	X	1.50691	-352.4	87.1	16.0	1.60	0.78
		O	1.50803	-356.8	95.6	25.9	1.00	0.72
A	600	O	1.00131	-299.6	183.9	132.1	2.75	0.99
	300	O	1.09357	35.7	215.3	224.7	3.93	1.71
B1	600	O	1.11662	-201.5	215.5	71.3	2.20	1.54
	300	O	1.21604	129.9	216.4	180.8	2.69	3.41
C1	600	O	1.03251	-178.2	256.3	94.7	2.24	1.18
	300	O	1.14383	191.5	300.2	280.0	2.98	1.78

HELIOS 계산: Current Coupling Option -4, Resonance 처리 Option 1

*0.02/16/4: Ray Spacing, cm/No. of Azimuthal Angles/ No of Polar Angles



(a) 간극이 없는 경우 (b) 간극이 있는 경우

그림 4. 집합체간 간극 처리에 따는 봉출력 변화(600 K)

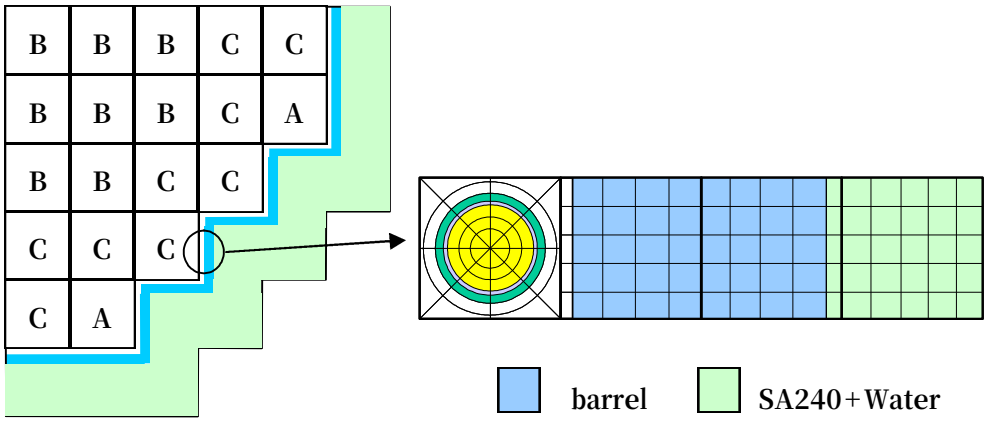


그림 5. 노심장전모형 및 Cell Division

표 2. 2차원 노심 계산 결과 비교

Temp.(K)	kinf			Max. Power	Computing
	DeCART	MASTER	Diff.(pcm)	Diff.(%)	Time,sec*
600	1.01990	1.02047	56.6	1.21	3344
300	1.13849	1.14106	225.7	5.35	3432

DeCART: 0.05/8/2

* 1GHz PENTIUM III PC

1.319	1.299	1.248	1.175	0.675
-1.21	-1.00	-0.16	0.17	1.19
	1.277	1.215	1.065	0.490
	-0.55	0.00	0.28	1.02

RPD, DeCART	1.164	0.770
% Diff., CASMO/MASTER	0.17	0.00

(a) 600 K

1.326	1.312	1.282	1.216	0.637
-4.00	-3.35	-1.72	-0.25	3.61
	1.297	1.249	1.081	0.430
	-2.62	-1.04	0.74	5.35

RPD, DeCART	1.189	0.732
% Diff., CASMO/MASTER	0.67	3.55

(b) 300K

그림 6. 노심 출력분포 비교